DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160798

李强坤, 胡亚伟, 苏欣. 排水沟渠水-底泥-植物协同作用下非点源溶质氮运移模拟研究[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(3): 460−466
Li Q K, Hu Y W, Su X. Simulation of non-point source solute nitrogen transport in drainage ditches under water-sediment-aquatic plant synergy[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(3): 460−466

排水沟渠水-底泥-植物协同作用下非点源溶质氮运移模拟研究*

李强坤, 胡亚伟, 苏 欣

(黄河水利委员会黄河水利科学研究院 郑州 453003)

摘 要: 沟渠系统"过程拦截"是现阶段农业非点源污染控制和管理的重要手段。针对当前农田排水沟渠水体-底泥-植物系统内各介质间非点源溶质迁移转化机制不清的现状, 在简要分析农田排水沟渠水-底泥-植物复合生态结构及其各组分功能特征的基础上, 以沟渠中水体为中心, 解析了非点源溶质氮在沟渠系统单一介质以及不同介质间的迁移转化过程; 考虑到排水沟渠中水体和污染物均以沿沟渠方向线性迁移为主, 应用水流连续方程和非保守性污染物迁移扩散方程, 构建了农田排水及其中非点源污染物在排水沟渠中的一维迁移模型, 并结合试验沟渠具体情况进行了适度简化; 通过内业可控性监测试验, 同时提出了沟渠系统水-底泥-植物不同介质对水体中非点源污染物衰减程度影响的量化计算方法; 将所建模型与计算参数应用于野外试验沟渠, 以氨态氮和硝酸盐氮为例进行模拟, 结果表明模拟结果与实测值结合较好, 其中氨态氮模拟效率系数为 0.87, 硝态氮模拟效率系数 0.93, 表明所建模型及模拟手段符合试验沟渠实际情况, 具有较好的适用性。

关键词: 非点源污染; 农田排水沟渠; 水-底泥-植物系统; 氮; 运移模拟
中图分类号: X143; X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)03-0460-07

Simulation of non-point source solute nitrogen transport in drainage ditches under water-sediment-aquatic plant synergy*

LI Qiangkun, HU Yawei, SU Xin

(Institute of Yellow River Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Along highlighted water environmental issues and gradual evolution of point source pollution (PSP) such as industrial waste, agricultural non-point source pollution (AGNSP) due to non-scientific applications of fertilizers and pesticides has had an increasing attention in recent years. On the basis of strengthening field "source control", making the best use of agricultural drainage ditch/pond system (interception process) is critical for agriculture non-point source pollution control and management. Drainage ditches have compound ecosystem structures, which are consisted of water-sediment-plant synergy. Migration and transformation of non-point source solute is important in the study of interception, control and management of agricultural non-point source pollution in drainage ditches. However, non-point source solute transformation processes in each medium in water-sediment-plant system of farmland drainage ditch have remained largely unclear. Based on the analysis of ecological structure and drainage ditch characteristics, this paper described the transformation of non-point

* 国家自然科学基金项目(51379085)资助
李强坤, 主要研究方向为生态水文与环境水文、农业水土环境等。E-mail: liqiangk@126.com
收稿日期: 2016-09-06 接受日期: 2016-12-08

* This research was supported by the National Natural Science Foundation of China (51379085).
Corresponding author, LI Qiangkun, E-mail: liqiangk@126.com
Received Sep. 6, 2016; accepted Dec. 8, 2016

source soluble nitrogen in water-sediment-plant system of farmland drainage ditch. In combination with the characteristics of farmland drainage ditch water pollution migration, a model of agricultural water pollution migration in drainage ditch system was constructed. The model was based on continuity equation for flow and pollutants migration. It was used to test, monitor and advance a quantitative method of calculation of the effect of different water-sediment-plant media on attenuation degree of non-point source pollutant in water body. Using Qingshui drainage ditch in the People's Victory Canal Irrigation District in Henan Province as a case study, the model was used to calculate the parameters of a field experimental ditch loaded with ammonia nitrogen and nitrate nitrogen pollutants. The results showed that the simulated and measured values fitted well. The simulation efficiency coefficient of ammonia nitrogen was 0.87 and that of nitrate nitrogen was 0.93. The results demonstrated that the model was available and effective for the simulation of drain pollution in ditches in agricultural farmlands.
Keywords: Non-point source pollution; Farmland drainage ditch; Water-sediment-plant system; Nitrogen; Transportation simulation

随着水环境问题的突出以及工业废污等点源污染的逐步整治，由于化肥农药不科学施用而引起的农业非点源污染问题日益引起人们的关注和重视。结合当前我国农业生产现状，在加强田间“源头控制”的基础上，充分发挥沟渠(塘)系统“过程拦截”是目前农业非点源污染控制和管理的重要手段[1-2]。灌区网状分布的大量排水沟渠为非点源溶质净化提供了非常有利的“平台”。农田狭长的排水沟渠可视为具有河流和湿地特征的独特工程化生态系统[3]，在生态学和物理学上具有与线性湿地相似的功能[4]。大量的相关试验表明农田排水沟渠对非点源溶质具有较好的拦截效果。Meuleman 等[5]指出，天然沟渠能够吸收水体中氮磷污染物，其中对磷素的去除率高达 90%~95%；Kröger 等[6-7]研究发现，一条长约 400 m，宽约 7 m 农田排水沟对可溶性无机氮的截留率可以达到 57%，对磷素的截留率可以达到 44%；吴军等[8]在江西省灌溉试验中心进行的沟塘湿地对农田面源污染的降解试验表明：沟塘湿地对农田排水中总氮、总磷的综合去除率可达到 70%~80%。随着沟渠湿地研究的持续升温，类似结果还有很多[9-10]。总结国内外关于农田排水沟渠系统净化农业非点源溶质的相关研究，可得出以下结论：①农田排水沟渠对非点源溶质具有明显的净化效果；②应用农田排水沟渠“拦截”农业非点源污染尚未形成完善的理论体系，当前研究主要集中于局部或单条、多条沟渠的对比试验、水生植物备选及生态结构形式探讨等层面，关于农田排水沟渠水-底泥-植物系统内各介质间非点源溶质的迁移转化机制尚不清楚，关于其间非点源溶质的运移模拟研究更少，这也是阻碍沟渠湿地进一步调控运用的焦点和技术难点。为此，本项研究以排水沟渠水-底泥-植物协同作用下非点源溶质运移为对象，基于水流连续方程和污染物迁移转化方程，以监测试验为基础，通过估算水-底泥-植物不同介质对水体中污染物衰减程度的影响，以非点源溶质氮为例，对野外试验沟渠中氨态氮和硝酸盐氮的运移进行了模拟，以供后期进一步研究借鉴参考。

1　沟渠生态特征与营养盐迁移转化

1.1　沟渠生态特征

农田排水沟渠系统起始于田间毛沟或农沟，经支沟、干沟或总干沟排入外界大面积水体。排水沟渠的生态结构一般可分为 3 个层次(图 1)。上层为水生植物突出水面之外的茎、叶，并随排水沟渠中的水位高低有所变化。水生植物一般为适于在排水沟渠环境中生长的芦苇(*Phragmites communis*)、蒲草(*Typha orientalis*)等挺水植物，夏秋季生长旺盛，冬春季枯萎；中间层为排水沟渠中输送的农田退水、浮游生物以及水生植物淹没于水中的部分茎、叶，沟渠中水位高低随农田灌溉(降雨径流)而呈现周期性的变化；底层为水生植物的根系、排水沟渠中富含营养物的基质底泥(淤积物)以及滋生于其中的各类微生物。

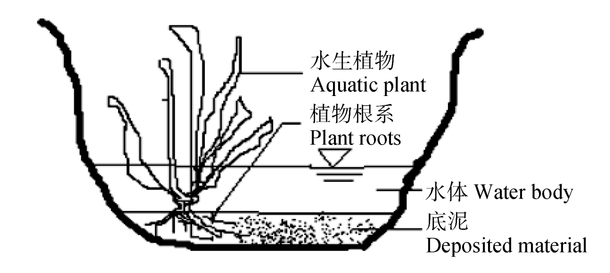


图 1　农田排水沟渠生态结构示意图
Fig. 1　Schematic diagram of ecological structure of farmland drainage ditch

农田排水沟渠水-底泥-植物独特的生态结构决定了其特有的生态特征。排水沟渠中生长着适应于此环境的水生植物，并在年内周期性地生长变化；渠底基质淤积物随水位升降周期性地暴露、淹没；底泥淤积物中丰富的“营养源”保证了水生植物的生长需求和其中各类微生物的繁衍。当农田排水流经

时，其中的有机质、氮、磷等营养成分将发生复杂的物理、化学和生物转化作用[11]。

1.2 沟渠氮营养盐迁移转化过程

由于过量施肥灌溉引起的田间氮素流失，构成农田排水沟渠中主要营养盐。氮在农田排水中主要以有机氮和无机氮两种形式存在，农田排水沟渠水-底泥-植物系统中氮的迁移转化包括矿(氨)化作用、硝化与反硝化作用、植物吸收和底泥吸附作用等。具体可分解为：一是基质底泥和水体之间氮的交换，包括基质底泥对水体中有机氮的沉积吸附以及基质底泥的氨态氮再生作用，基质底泥中微生物对水体中氨态氮和硝态氮的吸收、分解，水体与基质底泥中氮的硝化与反硝化作用等。二是水生植物和水体间氮的转化，一方面水生植物可以直接从沟渠水体中吸收 NH_4^+、NO_3^-离子并同化为自身所需要的物质(蛋白质和核酸等)，从而净化水体；另一方面由于植物生长的周期性特征，秋冬季节植物枯败会增加水体中的有机氮，进而矿化为氨态氮，引起水体二次污染。氮在农田排水沟渠水-底泥-植物系统中的迁移转化可概括为图2。

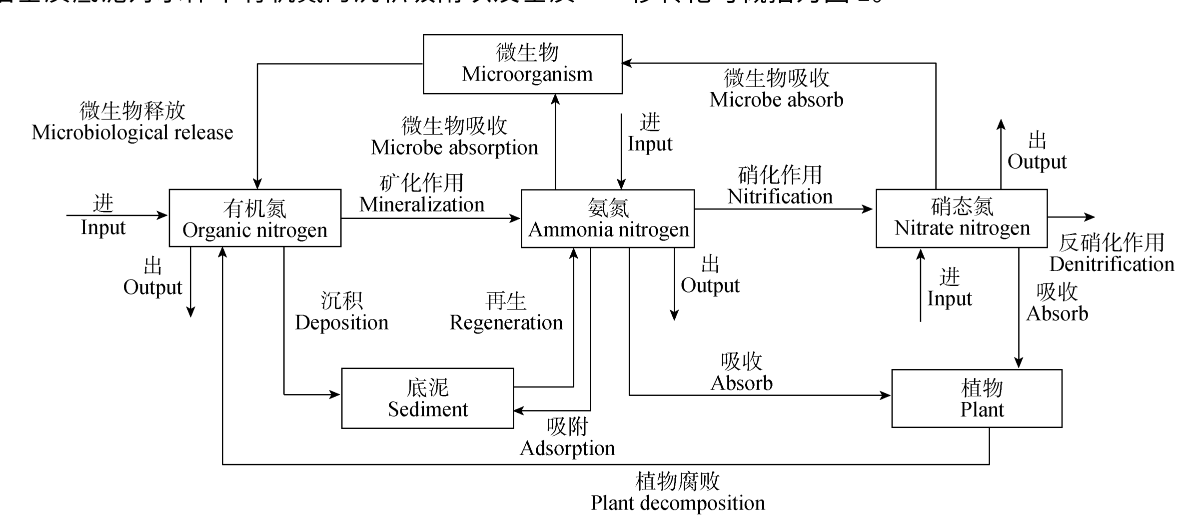


图2 农田排水沟渠水-底泥-植物中氮的迁移转化

Fig. 2 Migration of nitrogen in the system of water-sediment-plant of drainage ditch of farmland

2 模型构建与参数确定

2.1 沟渠系统水体及污染物迁移模型

考虑到排水沟渠中水体和污染物均以沿沟渠方向纵向迁移为主，基于水流连续方程和非保守性污染物迁移扩散方程，文献[12]将排水沟渠中水体及污染物运移描述为式(1)和式(2)。

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=q \tag{1}$$

$$(1+K)\frac{\partial C}{\partial t}+u\frac{\partial C}{\partial X}=K_s\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}+\frac{\partial C_q}{\partial t}+\frac{\partial C'}{\partial t} \tag{2}$$

式中：Q为t时刻通过排水沟渠断面A的流量($m^3·s^{-1}$)；q 为侧向流量强度(考虑沟渠侧渗)($m^3·s^{-1}·m^{-1}$)；A 为渠道过水断面面积(m^2)；x 为模拟断面距控制断面的距离(m)；C 为排水沟渠中典型污染物的浓度($mg·L^{-1}$)；C_q 为各排水沟渠“点源”汇入口典型污染物的浓度($mg·L^{-1}$)；C'为支干级排水沟所接纳的深层排水中某类污染物的浓度($mg·L^{-1}$)；u 为断面平均流速($m·s^{-1}$)；K_s 为污染物剪切流弥散系数($m^2·s^{-1}$)，又称纵向弥散系数，是表征流动水体中污染物在沿水流方向(或纵向)弥散的速率系数，其物理意义是：单位时间内污染物在纵向弥散的面积；K为综合衰减系数(d^{-1})，指污染物在水体中衰减变化的速率，其物理意义是单位时间内污染物在水体中衰减掉的百分率。污染物综合衰减系数不仅与污染物可降解性(或易衰减性)本身有关，还与水动力条件及外界的水温等有关。

本项研究外业试验沟渠为河南省人民胜利渠灌区清水渠，试验段长度 600 m，上下游控制断面间没有其他沟(渠)分支，水流相对封闭，上下游变化不大；同时由于排水沟渠切割较浅，沟渠深层二次排水及侧渗较少。因此，本项研究中可对公式(1)、公式(2)进行简化，去掉侧向流量强度 q、分支沟(渠)汇入项 Cq、沟渠深层排水项 C'，进而简写为公式(3)、公式(4)。

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=0 \tag{3}$$

$$(1+K)\frac{\partial C}{\partial t}+u\frac{\partial C}{\partial X}=K_s\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{4}$$

式中：流量 Q、断面面积 A、流速 u、典型污染物浓度 C 参数均可由试验测定。污染物剪切流弥散系数 K_s 可以利用模拟断面上的实测流速或浓度资料进行

推求[13]。

2.2　综合衰减系数 K 的推求

综合衰减系数 K, 不仅反映了污染物在水体作用下降解速度的快慢, 还是研究区域水质污染变化、计算水环境容量以及纳污能力的重要参数。国内外关于综合衰减系数 K 值的确定已有较长的研究历史, 但研究方法和成果多侧重于河流和湖泊等大面积水体, 对农田排水沟渠中综合衰减系数的研究较少。

结合图 2 所示沟渠系统内部氮的迁移转化过程, 进一步研究可将农田排水沟渠衰减系数 K 分解为:

$$K=K_w+K_m+K_p \tag{5}$$

式中: K_w 指水体自身运动引起的污染物衰减(d^{-1}), 如水体表层蒸发、水体内部发生的硝化与反硝化作用等; K_m 为沟渠底层淤积物引起的水体中污染物衰减(d^{-1}), 图 2 中可看出包括有机氮的沉降、对氨态氮的吸附和再生等, 其中包括底泥中的微生物对水体中污染物的分解等作用; K_p 为沟渠中水生植物引起的水体中污染物衰减(d^{-1}), 包括植物对水体中各类含氮离子的吸附净化(正值)以及由于水生植物枯败引起的水体中有机氮进而氨态氮等不同含氮污染物的增加(负值)。

K_w、K_m 和 K_p 的确定可采用两种方法, 一是必要的监测试验, 二是应用相关动力学模型进行分解测算。本项研究中采用监测试验的方法确定。

2.3　参数确定

为确定农田排水沟渠中 K_w、K_m 和 K_p 不同时间段的变化, 鉴于沟渠外业试验多种影响因素的不可控性, 选择在黄河水利科学研究院节水与农业生态实验基地(河南省新乡市)进行静态监测试验。

涉及本项研究的试验包括 3 个相同规格的 PVC 试验模拟箱(长×宽×高: 2 m×0.65 m× 0.65 m), 其中 1 号模拟箱仅加入水样, 可确定 K_w; 2 号模拟箱在箱底均匀铺设 20 cm 底泥, 试验用底泥取自项目外业实验地——河南省人民胜利渠灌区清水渠, 并经自然阴干、粉碎、去除杂质; 3 号模拟箱在铺设 20 cm 底泥的基础上, 移栽已经培育好的芦苇, 初始种植密度为 10 株·m^{-2}。试验时间段为 2014 年 4 月至 2015 年 3 月, 试验过程中结合外业试验沟渠实测污染物浓度采用水体中添加尿素[$CO(NH_2)_2$]和磷酸氢胺[$(NH_4)_2HPO_4$]混合溶液调控水体中氮、磷浓度。水样每 10 d 取样 1 次, 底泥样品每月采集 1 次。各项样品提取按照相关规定进行必要的前处理后进行实验室化验分析, 主要分析仪器为 Smartchem 140 全自动化学分析仪。具体试验布置可参见文献[14]。

依据水样、底泥样品中监测数据, 应用体积法计算水体中含氮量, 见式(6), 应用质量法计算底泥中氮含量, 见式(7)。

$$W_w=V_w\times C_w \tag{6}$$

$$W_m=M_m\times C_m \tag{7}$$

式中: W_w、W_m 分别为水体中、底泥中所含氮素(g); V_w 为试验箱中水体体积(m^3), 可在取样时进行现场测定; M_m 为每月取样时试验箱中底泥质量(kg), 可采用装箱底泥总质量扣除每次取样提取的底泥质量获得; C_w 为水体中相应氮素体积比浓度($mg\cdot L^{-1}$); C_m 为底泥中质量比浓度($g\cdot kg^{-1}$)。

依据上式计算结果, 可进一步计算 K_w 见式(8), K_m、K_p 可同理据此推算。

$$K_w=(W_{w,i,1}-W_{w,i+1,1})/(W_{w,i}\times d) \tag{8}$$

式中: i、i+1 指相邻两次试验取样; d 为两次取样期间间隔天数。

需要指出的是, 依据上述各式计算所得衰减系数是应用静止水箱模拟排水沟渠监测试验获得, 与野外农田排水沟渠在水力特性、曝气等方面还有一定出入, 其优势主要在于实验的可控性, 能够分别估算底泥、水生植物对水体中溶质的影响程度。

2.4　模型输入与求解

模型计算时, 水量采用第 1 类(Dirichlet)边界条件, 排水过程模拟上边界条件为模拟排水沟起始端水量, 下边界条件为排水沟出口控制水位, 计算模型为封闭性模型; 污染物计算采用第 2 类(Neumann)边界条件, 设定模拟排水沟起始端污染物浓度为初始条件。具体求解过程可以采用非耦合求解, 即先单独求解水流连续方程, 求出有关水力要素后, 再求解污染物迁移转化方程, 推求沟渠典型污染物输出结果。

确定模型中有关参数后, 求解时水流方程采用四点隐式差分格式离散, 污染物质随流沿程衰减的剪切流弥散方程采用显式差分格式, 应用计算机编程进行求解。

3　模型应用与效果分析

3.1　模型验证

将前文所建模型及相关参数应用于项目外业试验沟渠河南省人民胜利渠灌区清水渠进行验证。该渠起始于河南省新乡市原阳县, 流经获嘉县并最终进入人民胜利渠总干渠。清水渠因早年渠水清澈而得名, 近年由于两侧农田化肥、农药施用及农田排水进入而使水质变差。农田灌溉期间, 由于上游大量排水进入, 两侧农田又从沟渠中提水进行灌溉,

属于灌排合一沟渠。试验沟渠段布置在清水渠与东一干渠交叉枢纽下游约 500 m，试验段总长度 600 m，相对封闭，没有其他进水口和排水口，沿水流方向分别布设 1、2、3 号断面，详见图 3 所示。

模拟过程中，以图 3 中沿水流方向 1 号断面(D1)所测氮的浓度作为输入浓度，3 号断面(D3)作为模拟的目标浓度，以氨态氮和硝酸盐氮为例进行模拟。结果见图 4。

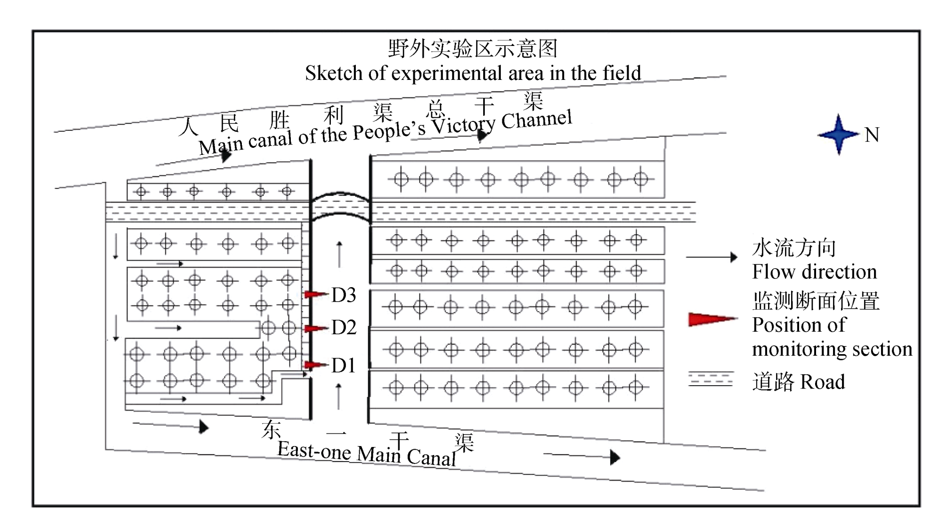


图 3　模型验证试验布置示意图

Fig. 3　Schematic diagram of experiment layout for model verification

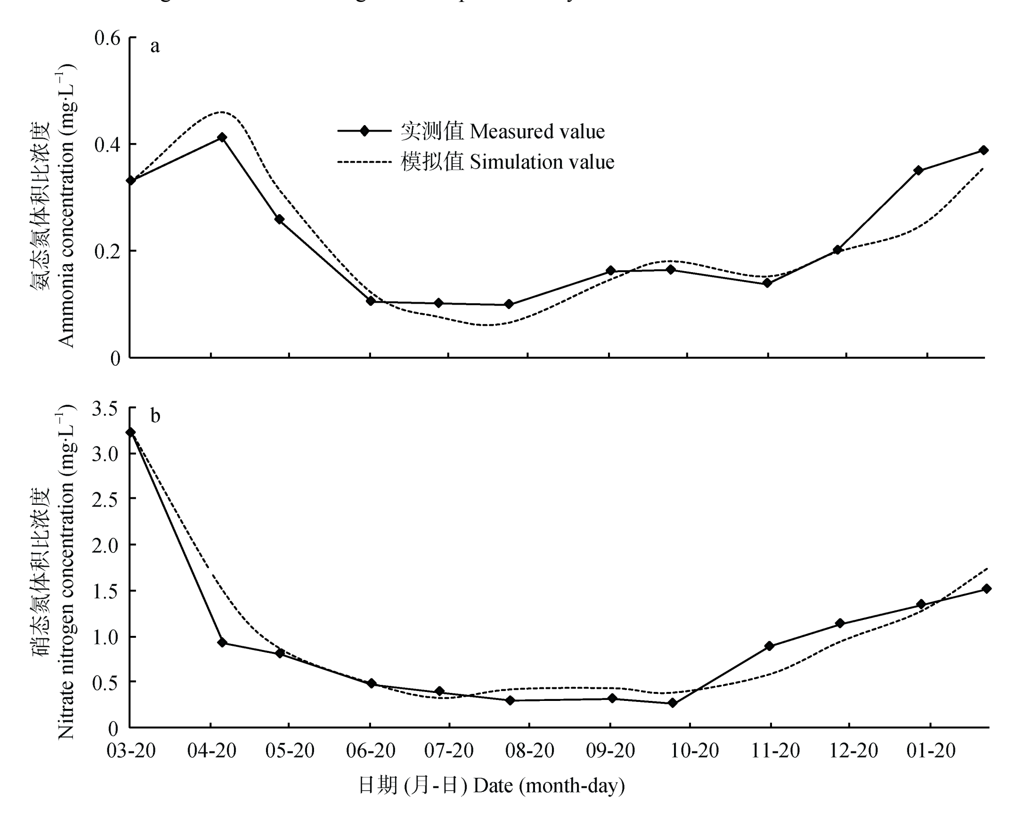


图 4　氨态氮(a)和硝态氮(b)实测数据与模拟数据(图 3 中号断面的输出浓度)对比图

Fig. 4　Contrast between simulated and measured (the output concentrations of the D3 section in the figure 3) concentrations of ammonia nitrogen (a) and nitrate nitrogen (b)

3.2　模拟结果的合理性分析

将 3 号断面实测氨态氮、硝态氮体积比浓度分别点绘于图 4。可以看出图 4a 中氨态氮的模拟结果与实测值在浓度峰值和低谷有差别，2014 年 4 月 24 日实测浓度峰值为 0.41 $mg\cdot L^{-1}$，模拟浓度为 0.46 $mg\cdot L^{-1}$，实测浓度最低值为 2014 年 8 月 12 日的 0.10 $mg\cdot L^{-1}$，相应模拟值为 0.07 $mg\cdot L^{-1}$，峰谷值略有出入；计算模拟时段内实测氨态氮体积比浓度平均值为 0.23 $mg\cdot L^{-1}$，

模拟结果平均值为 0.25 mg·L^{-1}, 二者较为接近。比较图 4a 中实测氨态氮体积比浓度和模拟浓度变化曲线, 二者变化趋势基本一致。图 4b 中对硝态氮浓度的模拟无论是模拟时段内峰谷值的拟合程度以及浓度曲线的变化趋势, 模拟结果均好于图 4a 中对氨态氮的模拟, 计算水体中实测硝态氮体积比浓度平均值为 0.98 mg·L^{-1}, 模拟平均值为 1.02 mg·L^{-1}, 二者更为接近。

为进一步分析模拟结果的合理性, 同时采用 Nash-Suttcliffe 模拟效率系数(NSC)对模型模拟结果进行评价。计算公式见式(9):

$$\mathrm{NSC}=1-\frac{\sum\left(X_{\mathrm{obs}}-X_{\mathrm{calc}}\right)^{2}}{\sum\left(X_{\mathrm{obs}}-\bar{X}_{\mathrm{obs}}\right)^{2}} \tag{9}$$

式中: X_{obs} 为实测值, X_{calc} 为模型计算值, $\bar{X}_{obs}$ 为实测值的算术平均值。当模型计算值和实际监测值相等时, NSC=1, 模拟效果最好; 通常 NSC 在 0~1 之间, NSC 越大, 说明计算值与观测值匹配程度越好。

应用式(9)进行计算, 氨态氮模拟效率系数(NSC)为 0.87, 硝态氮的 NSC 为 0.93, 同上述分析结果基本吻合, 说明模型模拟结果均可以接受(大于 0.75), 其中模型对硝态氮的模拟精度略高于对氨态氮的模拟精度。

4 讨论与结论

目前, 单纯用于描述农田排水沟渠系统水体及污染物运移的数学模型较少, 大部分模型都是在湖泊或河流模型的基础上发展起来的。20 世纪 90 年代, 基于浅水湖泊富营养化模型 PCLake 的基础上, 荷兰瓦跟宁根大学(Wageningen UR)开发了 PCDitch 模型[15-16], 该模型包涵营养物质循环、藻类、水生植物、底栖动物、浮游动物和鱼类等模块, 同时包括水体和底泥区域, 是用于模拟农田沟渠水环境变化及其对沟渠生物影响的富营养化模型。之后的 Waterpas-models 模型能够预测沟渠水位变化和耕作方式等对农业生产力、农业收益和环境造成的影响[17], 模型模拟发现, 过高的沟渠水位不仅会减少农业收成和降低农民的经济收益, 而且还会增加地表水中的营养负荷, 从而加重区域农业非点源污染。国内方面, 由于灌区农田排水沟渠系统多呈“树”型分级布设, 类似于线性河网系统, 因此沟渠系统水体和其中污染物的模拟多借鉴河道水质水量模型进行构建, 水量模拟采用水流连续方程, 其中的污染物采用一维的非保守污染物迁移转化方程模拟[18-19], 也都取得了不错的模拟效果并成为当前用于沟渠系统水体和污染物运移模拟的主要模型。

应用水流连续方程和非保守污染物迁移转化方程模拟存在的最大问题在于要有一定的沟渠试验监测资料进行明显的验证和校正, 其中的难点主要在于典型污染物综合衰减系数 K 的确定。由图 2 中排水沟渠水-底泥-植物中氮的迁移转化过程可以看出, 其中氮的迁移转化非常复杂, 文献[18]曾把影响综合衰减系数 K 的因素分为 6 类, 并认为很难一一描述, 采用反问题求解技术确定了综合衰减系数 K。文献[19]也认为综合衰减系数 K 是农业非点源溶质在排水沟渠系统中多种作用的综合, 其中包括: 水体中污染物沉降、已经沉降污染物的再悬浮、渠底沉积物对水体中污染物的截留、吸附等多个过程, 认为在实际工作中这些过程、作用很难监测和区分, 因此一般取其综合作用效果, 并在具体计算过程中, 根据不同级别排水沟渠典型渠段断面试验资料通过两点法确定了综合衰减系数 K。这两种处理方法实质是将图 2 中所述沟渠系统水-底泥-植物复合生态体系中各类迁移转化作用进行了归一处理, 不能分类突出各生态组分在体系中的作用机制。本项研究中, 依据排水沟渠水-底泥-植物中氮的迁移转化特征, 将综合衰减系数 K 进一步细化为 3 部分, 分别是: 水体自身运动引起的污染物衰减系数 K_w、沟渠底层淤积物引起的水体中污染物衰减系数 K_m 及沟渠中水生植物引起的水体中污染物衰减系数 K_p, 并结合模拟实验进行参数确定, 相比于以往的综合作用而言研究进一步深入, 也更加符合排水沟渠水-底泥-植物单一介质及不同介质间的相互作用机制。

从模拟结果看, 文献[19]应用式(1)、式(2)对青铜峡灌区第一排水沟沟渠系统水量和污染物进行了模拟, 并同样采用 Nash-Suttcliffe 模拟效率系数对模型模拟结果进行了评定, 效率系数为 0.82; 本次研究结合研究沟渠实际情况, 将原式(1)、式(2)简化为式(3)、式(4), 对研究沟渠氨态氮、硝酸盐氮运移情况进行模拟, 氨态氮模拟效率系数为 0.87, 硝态氮模拟效率系数为 0.93, 均具有较好的模拟效果。

综合上述, 本文研究结论可归纳如下:

1)在简要分析农田排水沟渠水-底泥-植物独特的生态结构基础上, 提出了非点源溶质氮在沟渠水-底泥-植物系统内迁移转化过程。

2)结合农田排水沟渠水污运移特点, 基于水流连续方程和污染物迁移转化方程, 初步构建了农田排水沟渠水污运移模型, 并通过监测试验, 提出了水-底泥-植物不同介质对水体中非点源污染物衰减

程度影响的量化计算方法。

3)将所建模型与计算参数应用于野外试验沟渠，以氨态氮和硝酸盐氮为例进行模拟，结果表明模拟结果与实测值结合较好，其中氨态氮模拟效率系数为 0.87，硝态氮模拟效率系数 0.93，表明所建模型和参数计算结果具有可适用性。

参考文献 References

[1] 李丽华，李强坤. 农业非点源污染研究进展和趋势[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(1): 13–22
Li L H, Li Q K. The progress and trends of agricultural non-point source pollution research[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2014, 31(1): 13–22

[2] 孙宁宁. 水稻灌区新型农田水利系统防污减污试验研究[D]. 武汉：武汉大学, 2012: 80–95
Sun N N. Experiment and study of pollution mitigation by new irrigation and drainage system in rice-based irrigation districts[D]. Wuhan: Wuhan University, 2012: 80–95

[3] Needelman B A, Kleinman P J A, Strock J S, et al. Improved management of agricultural drainage ditches for water quality protection: An overview[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 62(4): 171–178

[4] Strock J S, Dell C J, Schmidt J P. Managing natural processes in drainage ditches for nonpoint source nitrogen control[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 62(4): 188–196

[5] Meuleman A F M, Beltman B. The use of vegetated ditches for water quality improvement[J]. Hydrobiologia, 1993, 253(1/3): 375

[6] Kröger R, Holland M M, Moore M T, et al. Hydrological variability and agricultural drainage ditch inorganic nitrogen reduction capacity[J]. Journal of Environmental Quality, 2007, 36(6): 1646–1652

[7] Kröger R, Holland M M, Moore M T, et al. Agricultural drainage ditches mitigate phosphorus loads as a function of hydrological variability[J]. Journal of Environmental Quality, 2008, 37(1): 107–113

[8] 吴军，崔远来，赵树君，等. 沟塘湿地对农田面源污染的降解试验[J]. 水电能源科学, 2012, 30(10): 107–109
Wu J, Cui Y L, Zhao S J, et al. Experiment of agricultural non-point source pollution mitigation by field drain and pond wetland[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(10): 107–109

[9] 张树楠，肖润林，刘锋，等. 生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应[J]. 环境科学, 2015, 36(12): 4516–4522
Zhang S N, Xiao R L, Liu F, et al. Interception effect of vegetated drainage ditch on nitrogen and phosphorus from drainage ditches[J]. Environmental Science, 2015, 36(12): 4516–4522

[10] 陈海生，王光华，宋仿根，等. 生态沟渠对农业面源污染物的截留效应研究[J]. 江西农业学报, 2010, 22(7): 121–124
Chen H S, Wang G H, Song F G, et al. Retention and removal effects of ecological ditch on agricultural non-point source pollutants[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2010, 22(7): 121–124

[11] 李强坤，胡亚伟，孙娟. 农业非点源污染物在排水沟渠中的迁移转化研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 210–214
Li Q K, Hu Y W, Sun J. Migration and transformation of agricultural non-point source pollutants in drainage ditches[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(1): 210–214

[12] 李强坤，胡亚伟，孙娟，等. 基于“源”、“汇”过程的农业非点源污染模型构建及应用[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(6): 1424–1430
Li Q K, Hu Y W, Sun J, et al. Establishment and application of source/sink-based agricultural non-point source pollution model[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(6): 1424–1430

[13] 李强坤，李怀恩. 农业非点源污染数学模型及控制措施研究：以青铜峡灌区为例[M]. 北京：中国环境科学出版社, 2010: 155–196
Li Q K, Li H E. Mathematical Model and Control Measures of Agricultural Non-Point Source Pollution[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2010: 155–196

[14] 李强坤，宋常吉，胡亚伟，等. 模拟排水沟渠非点源溶质氮迁移实验研究[J]. 环境科学, 2016, 37(2): 520–526
Li Q K, Song C J, Hu Y W, et al. Transformation of non-point source soluble nitrogen in simulated drainage ditch[J]. Environmental Science, 2016, 37(2): 520–526

[15] Janse J H. A model of nutrient dynamics in shallow lakes in relation to multiple stable states[J]. Hydrobiologia, 1997, 342–343: 1–8

[16] Janse J H. A model of ditch vegetation in relation to eutrophication[J]. Water Science and Technology, 1998, 37(3): 139–149

[17] de Vos J A, van Bakel P J T, Hoving I E, et al. Waterpas-model: A predictive tool for water management, agriculture, and environment[J]. Agricultural Water Management, 2006, 86(1/2): 187–195

[18] 王超，王沛芳，唐劲松，等. 河道沿岸芦苇带对氨氮的削减特性研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(3): 311–317
Wang C, Wang P F, Tang J S, et al. Ammonia sorption and retention characters in the riparian reed zone[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(3): 311–317

[19] 李强坤，胡亚伟，李怀恩. 农业非点源污染物在排水沟渠中的模拟与应用[J]. 环境科学, 2011, 32(5): 1273–1278
Li Q K, Hu Y W, Li H E. Simulation and application of the agricultural non-point source pollutants in drainage ditch[J]. Environmental Science, 2011, 32(5): 1273–1278